

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.01.007

风电机组低电压穿越测试继电保护策略研究

张松科, 易吉良, 李军军, 姜建伟, 江元元

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 为了提高电力系统的稳定性, 电网要求风电机组具备低电压穿越能力。在测试风电机组低电压穿越能力时, 为保证风电机组及电压跌落装置的安全, 设计了一套包括反时限过流保护、电流速断保护、低/过压保护、低/过频保护以及差动保护等5个保护模块的继电保护系统, 并在风电机组低电压穿越仿真测试平台上进行了验证。结果表明, 所设计的继电保护系统可以保证系统故障时可靠动作, 低电压穿越测试时不会误动作, 能够躲过风电机组起动时的尖峰电流, 起到保护电压跌落装置的作用。

关键词: 风电机组; 低电压穿越; 电压跌落装置; 继电保护

中图分类号: TM307+.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2014)01-0032-06

Relay Protection Strategy Research on LVRT Test of Wind Turbines

Zhang Songke, Yi Jiliang, Li Junjun, Jiang Jianwei, Jiang Yuanyuan

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In order to improve the stability of the power system, power grid requires wind turbines of low voltage ride through capability. To ensure the safety of wind turbines and voltage sag generator during the wind turbines LVRT test, a relay protection system with five relay protection models which includes inverse-time overcurrent protection, instantaneous overcurrent protection, low/over voltage protection, low/over frequency protection and differential protection is designed and verified on LVRT test platform of wind turbines. The results show that the relay protection system can guarantee reliable action in a system failure and no malfunction in low voltage ride through tests. The system can escape the starting peak current of wind turbines, thus protects the voltage sag generator.

Keywords: wind turbines; low voltage ride through; voltage sag generator; relay protection

1 研究背景

随着大容量风电机组的飞速发展, 风力发电在电力系统中所占的比例逐渐增加, 其对系统运行稳定性的影响不容忽视。在风电发展初期, 风电在电力系统中所占比重较小, 当电网发生故障时, 风电机组会因自我保护而立即脱网。对于风力发电装机

容量较大的系统, 风机脱网会造成电网的电压和频率严重下降, 导致故障加剧, 甚至引起电网崩溃^[1-2]。因此, 电网安全运行准则要求风力发电机组具有一定的低电压穿越能力, 以使风力发电机组在电网电压瞬间跌落时仍能保持并网^[3]。

国家电网公司企业标准《国家电网公司风电场接入电网技术规定(修订版)》对风电场低电压穿越

收稿日期: 2013-12-10

基金项目: 湖南省自然科学基金株洲市联合基金资助项目(12JJ9042)

作者简介: 张松科(1986-), 男, 河南洛阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为风电机组低电压穿越继电保护,

E-mail: zhangsongke@163.com

能力做出了如下要求:

a) 风电场内的风电机组具有在并网点(与公共电网直接相连的风电场升压变压器高压侧母线或节点)电压跌至额定电压的20%时,能够保证不脱网连续运行625 ms的能力;

b) 在发生跌落2 s内,风电场并网点电压能够恢复到额定电压的90%时,风电场内的风电机组能够保证不脱网连续运行。

我国国家电网公司规定的风电场低电压穿越运行具体要求如图1所示。

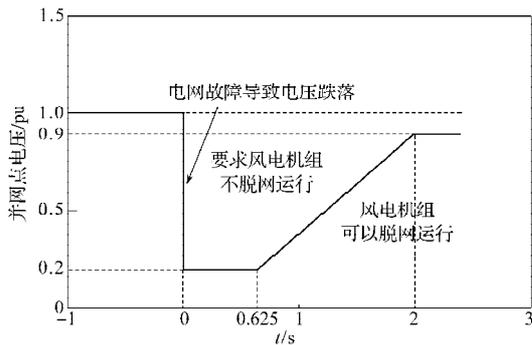


图1 风电场低电压穿越要求

Fig.1 Requirements of wind farm low voltage ride-through

在测试风电机组低电压穿越能力时,为了保证风电机组在正常工作以及在外部电网电压严重跌落时,测试低电压穿越运行,需要设计较为完善的保护模块,并采取相应的保护措施^[4]。

本研究拟利用MATLAB/SIMULINK搭建风电机组低电压穿越测试平台,并且对风电机组和电压跌落装置(voltage sag generator, VSG)建立仿真模型。在此基础上,根据风电机组与VSG的特点,以及各种保护的原理对该平台的继电保护模块进行具体设计,以为风力发电机组的继电保护装置设计提供一定的理论参考依据。

2 风电机组与VSG保护系统原理

风电机组低电压穿越测试平台的主要结构是电网通过电压跌落装置连接到风电机组,电压跌落装置可按照要求改变输出电压,使得风电机组并网点模拟出不同程度的电压跌落。根据对继电保护的要求,继电保护装置动作切除故障的时间必须满足系统稳定性要求。

保护系统共设置了5个保护风电机组与VSG安全运行的保护模块,即反时限过流保护模块、速断过流保护模块、低/过频保护模块、低/过压保护模块和差动保护模块^[5],如图2所示。

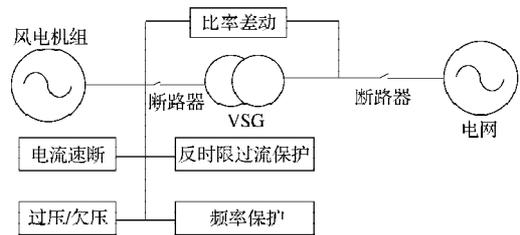


图2 风电机组和VSG保护系统

Fig.2 Wind turbines and VSG protection system

此保护系统适用于1.5 MW及以上双馈异步发电机型风电机组的低电压穿越仿真系统,以及2 MW及以上直驱发电机型风电机组的低电压穿越仿真系统。

2.1 反时限过流保护

反时限过流保护的動作时间随着过电流的增大而减小,当电流较大时,動作时限比较短;而当电流较小时,動作时限自动延长。适当地调节反时限特性曲线 $t=f(I)$,使反时限过流保护動作特性与发电机允许的过电流曲线相配合,就能有效地防止发电机承受过电流而损坏^[6]。本研究中,反时限过流保护的SIMULINK仿真模型如图3所示。

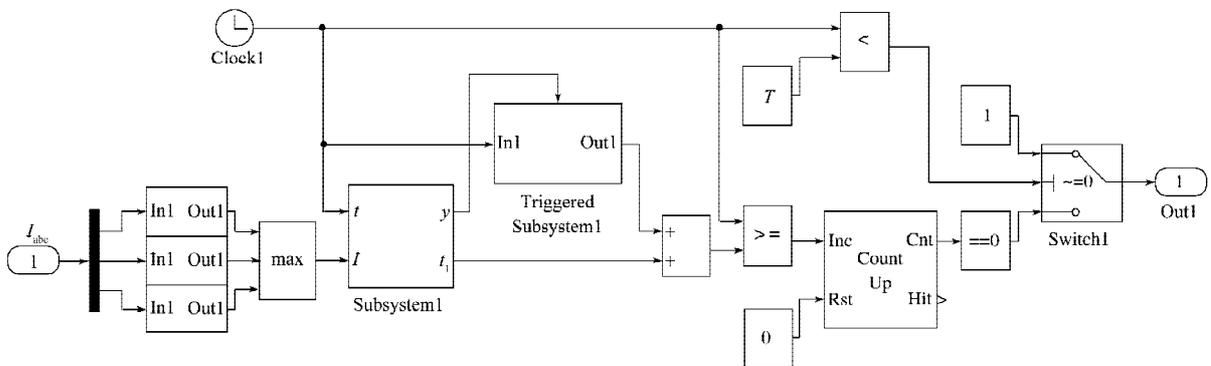


图3 反时限过流保护仿真模型

Fig.3 Simulation model of inverse-time overcurrent protection

系统反时限特性曲线 $t=f(I)$ 的数学模型为

$$t = A / (I^n - 1)^{\circ}$$

式中: I 是以发电机的额定电流为基值的故障电流标么值;

A 和 r 为常数, 且 A 的量纲为时间。

上式表明, 过电流继电器的动作时间 t 是故障电流 I 的函数。当 $I < 1$ 时, $t < 0$, 表示过电流继电器不动作; 当 $I > 1$ 时, $t > 0$, 过电流继电器动作于跳闸。故障电流越大, 继电器动作时间越小, 表明继电器动作时间与故障电流成反时限特性。

本方案中采用如下极端反时限特性数学模型:

$$t = \frac{A}{I^2 - (1 + \alpha)}$$

式中: α 为与温升裕度、定子绕组温升特性等因素有关的修正系数, 一般取 0.05;

常数 A 由制造厂提供, 本研究中取 80。

反时限特性模型中, 电流均以发电机额定电流 I_N 为基值^[7]。

2.2 速断过流保护

速断过流保护按照被保护设备的短路电流来整定, 当短路电流超过设定值时, 保护装置会立即动作, 断路器跳闸。速断过流保护没有延时, 动作可靠, 切断故障速度较快。

在本模型中, 采用速断过流保护作为短路故障的主保护, 能够自动改变整定值。由于风力发电机的起动电流一般比较大, 在起动过程中, 速断过流保护的整定值按躲过起动电流来设定。在起动过程结束后, 整定值自动减小为正常设定值, 从而提高系统故障情况下的灵敏度。

速断过流保护动作条件为:

$$\begin{cases} I_{\varphi} \geq I_m, t < T; \\ I_{\varphi} \geq I_s, t \geq T. \end{cases}$$

式中: I_{φ} 为相电流;

I_m 为起动过程中的速断电流定值;

T 为起动时间;

I_s 为正常运行时的速断电流定值。

所设计的速断过流保护的 SIMULINK 仿真模型如图 4 所示。

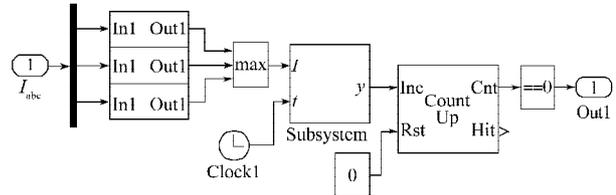


图4 速断过流保护仿真模型

Fig. 4 Simulation model of instantaneous overcurrent protection

2.3 低 / 过频保护

电网电压频率对电气设备有着较大的影响, 当频率过大或过小时, 都会对电气设备造成损坏。频率保护装置持续测量电网电压的即时频率, 并将测量值经过均值滤波算法处理后, 与电网固有频率进行比较, 若测量频率超出允许波动范围, 则频率保护动作, 断路器跳闸。

系统的低频保护动作条件为:

$$f < f_l, t \geq T_{f_l}$$

式中: f_l 为低频保护设定值;

T_{f_l} 为低频保护动作延时时间。

系统的过频保护动作条件为:

$$f > f_o, t \geq T_{f_o}$$

式中: f_o 为过频保护设定值;

T_{f_o} 为过频保护延时设定时间。

所设计的低 / 过频保护的 SIMULINK 仿真模型如

图 5 所示。

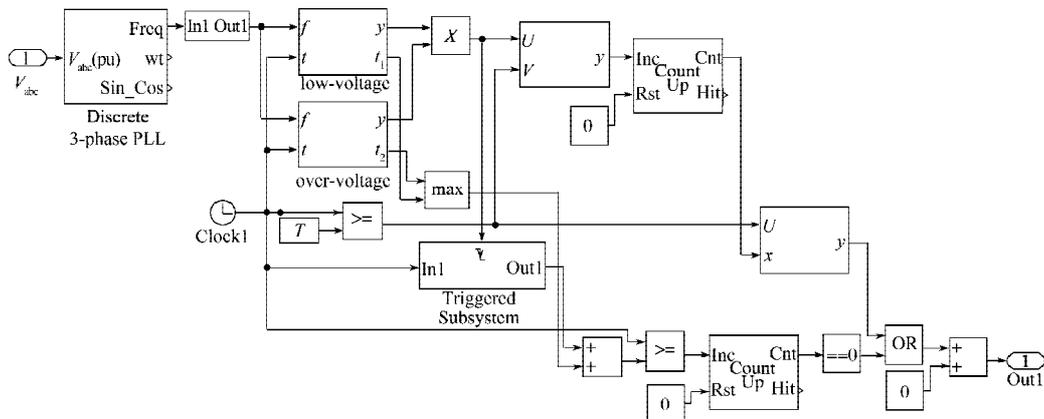


图5 频率保护仿真模型

Fig. 5 Simulation model of frequency protection

2.4 低 / 过压保护

电压故障要求反应速度较快, 当电网电压消失后, 保护动作, 断路器跳闸, 将风电机组从电网中

脱离, 以免风力发电设备遭到损坏。

低电压保护判据为: 当三相电压均小于低电压保护整定值时, 保护动作启动, 断路器延时跳闸。

过电压保护整定值可以参考电机能承受的冲击电压值来确定,当发生电压故障时,风电机组必须退出电网,一般情况下采取正常停机,然后再根据实际情况进行处理^[8]。

低电压保护动作条件为:

$$U \leq U_L, t \geq T_{VL}$$

式中: U_L 为低电压保护设定值;

T_{VL} 为低电压保护延时时间。

过电压保护动作条件为:

$$U \geq U_o, t \geq T_{Vo}$$

式中: U_o 为过电压保护设定值;

T_{Vo} 为过电压保护延时时间。

低/过压保护的 SIMULINK 仿真模型与频率保护相似,在此基础上添加电压跌落装置 VSG 动作判据,当 VSG 动作时,闭锁电压保护,防止此时继电保护误动作。

2.5 差动保护

差动保护是变压器的主保护,主要用来保护双绕组或三绕组变压器绕组内部及其引出线上发生的各种相间短路故障,同时也可以用来保护变压器单相匝间的短路故障。纵差保护分为比率制动式差动保护、标积比率制动式差动保护、故障分量差动保护等,本设计中采用比率制动式差动保护。比率制动式分相差动的作用是利用分相比率制动判据实现差动保护跳闸,其动作判据为^[9]:

拐点前:

$$I_{op} > I_{op, min}, I_{res} < I_{res, min}$$

拐点后:

$$I_{op} > I_{op, min} + K_{res} * (I_{res} - I_{res, min}),$$

$$I_{res} \geq I_{res, min}$$

式中: I_{op} 为差动电流的幅值;

I_{res} 为制动电流的幅值;

$I_{op, min}$ 为差动保护最小动作电流;

$I_{res, min}$ 为差动保护最小制动电流;

K_{res} 为制动系数。

以 A 相为例,其差动电流和制动电流分别为:

$$I_{op} = |I_A - I_a|,$$

$$I_{res} = \frac{(|I_A| + |I_a|)}{2}$$

式中: I_A 为变压器高压侧 A 相电流;

I_a 为变压器低压侧 A 相电流。

升压变压器一般采用 Yd11 接线方式,因此在差动保护中需要进行相位补偿。其补偿方式为:

$$\begin{bmatrix} I'_a \\ I'_b \\ I'_c \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}$$

式中: I'_a, I'_b, I'_c 分别为低压侧三相电流经补偿计算后的值;

I_A, I_B, I_C 分别为高压侧三相电流。

变压器差动保护的 SIMULINK 仿真模型见图 6。

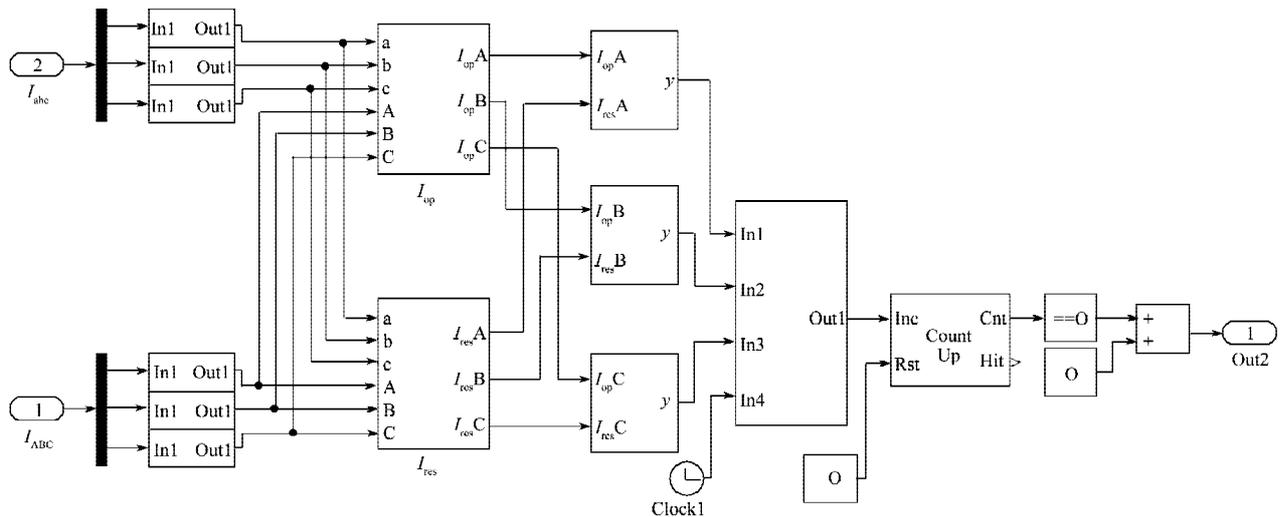


图6 差动保护仿真模型

Fig. 6 Simulation model of differential protection

3 仿真模型的建立

在 MATLAB 中,利用 SIMULINK 工具箱搭建了一个风电机组低电压穿越测试平台,在电压跌落装

置高低压侧断路器上安装了继电保护模块。低电压穿越测试保护系统如图 7 所示。

此保护系统设置了两个信号测量点:VSG 一次侧以及二次侧,测试信号包括一、二次侧电压、电流

以及频率。

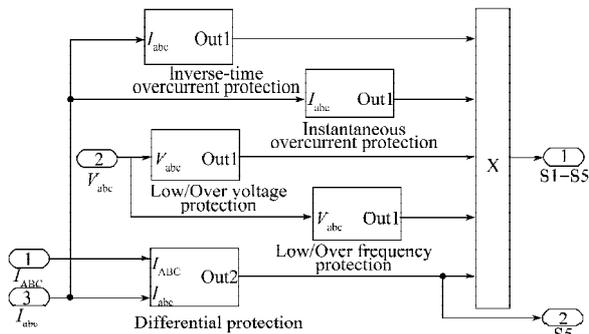


图7 风电机组低电压穿越测试保护系统

Fig. 7 Protection system of wind turbines LVRT test

所有的测试信号经过处理后被送到保护系统，保护系统共配置了反时限过流保护、电流速断保护、低/过电压保护、低/过频保护以及差动保护等5个保护模块。所有保护模块输出信号相遇后送入电压跌落装置两侧的断路器，断路器动作切除故障，保护整个机组安全运行。其中，反时限过流保护、电流速断保护、低/过电压保护、低/过频保护以及差动保护的动作用信号S1~S5发送至VSG二次侧断路器；差动保护信号S5发送至VSG一次侧断路器。

为了避免瞬时干扰或信号的不稳定使保护系统出现误动作，采用均值滤波法，每间隔1ms采样一次，连续采样3次，取平均值作为本次采样的信号值，并与动作值比较，可提高系统的抗干扰能力。均值滤波方法仿真如图8所示。

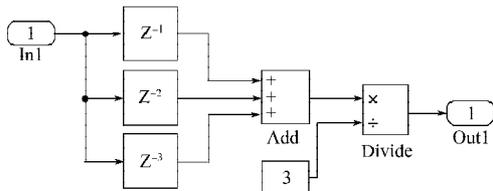


图8 均值滤波方法仿真

Fig. 8 Simulation of mean filter method

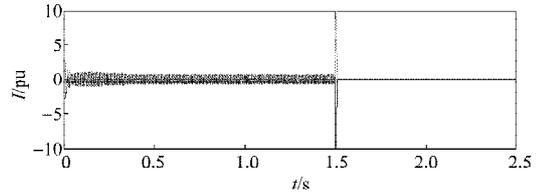
4 仿真结果

保护系统在保证可靠切除故障的同时，还要满足在低电压穿越过程中不发生误动作的要求。因此，对于系统发生故障和低电压穿越过程两种情况分别进行仿真。

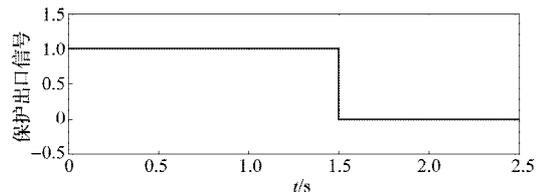
4.1 系统故障仿真

当系统发生故障时，电流、电压或频率会超过保护设定值，引起继电保护动作，断路器跳闸切除故障。采用图7所示仿真模型，对风电机组出口发生两相短路、三相短路等故障时进行仿真。设置仿真时

长为2.5s，故障出现时间为1.5s。实验所得仿真波形如图9和图10所示。



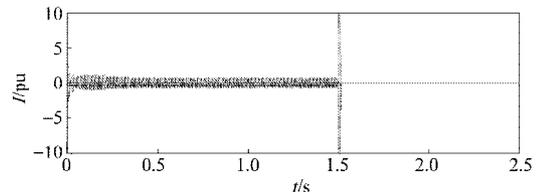
a) VSG低电压侧三相电流



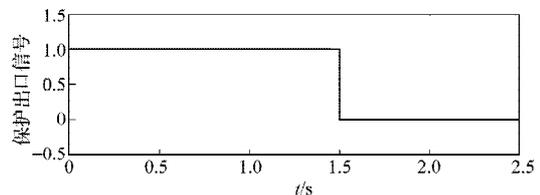
b) 保护出口信号

图9 AB两相短路仿真波形

Fig. 9 Simulation waveform of AB two phase short circuit



a) VSG低电压侧三相电流



b) 保护出口信号

图10 三相短路仿真波形

Fig. 10 Simulation waveform of three phase short circuit

由图9和图10可见，当系统运行到1.5s时，风电机组并网节点发生短路故障，系统电流急剧增大，可达到额定电流的10倍以上，远远超过了电流保护整定值，继电保护均能在10ms内发出跳闸信号（保护出口信号由1.0变0），使断路器跳闸，隔离故障。

4.2 低电压穿越过程仿真

在低电压穿越过程中，电网要求风电机组在一定时间内不能脱离电网运行。所以，在这段时间内，应当闭锁电压保护，以防止保护动作导致风机脱网。采用图7所示仿真模型，对电网电压跌至20%额定电压时，625ms内风电机组不得脱网运行进行仿真。设置仿真时长为3s，电压跌落起始时间为2s，结束时间为2.625s，低电压持续运行625ms。所得仿真波形如图11所示。

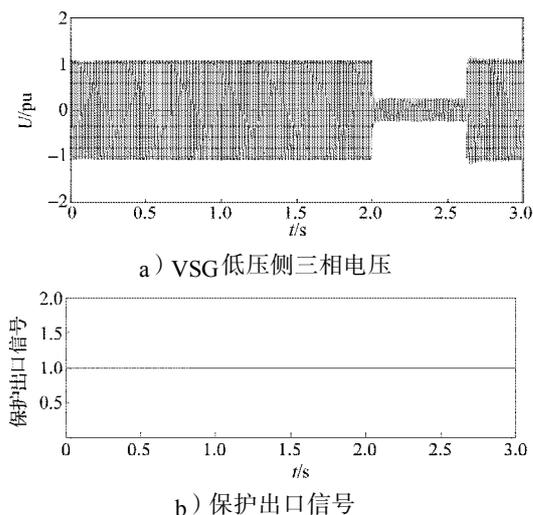


图 11 电压跌落至20%的仿真波形

Fig.11 Simulation waveform of voltage dropped to 20%

由图 11 可以看出, 仿真运行至 2 s 时, 电网电压突然跌落至额定电压的 20%, 此时, 电压保护被闭锁。因此, 在 625 ms 内继电保护并未动作, 风电机组保持并网运行。当运行至 2.625 s 时, 电网电压恢复正常, 风电机组重新发出有功功率。在此过程中, 继电保护系统可靠, 不动作。

5 结语

本文基于低电压穿越测试平台的继电保护系统, 论述了各种保护的基本原理, 并利用 MATLAB 的 SIMULINK 工具箱建立了仿真模型, 在系统故障和低电压穿越两种状态下分别进行了仿真实验。仿真结果表明, 所设计的保护系统实现了在系统故障时可靠动作, 而低电压穿越过程中不会误动作, 配合断路器实现有选择地动作。该保护系统结构简单, 动作可靠, 灵敏性高, 可以满足风电机组 LVRT 测试平台对于继电保护的要求。

参考文献:

[1] Okedu K E, Muyeen S M, Takahashi R, et al. Wind Farms Fault Ride Through Using DFIG with New Protection Scheme[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2012, 3(2): 242-254.

- [2] 杨广文, 肖强晖, 朱广辉, 等. 双馈异步风力发电机矢量控制研究[J]. 湖南工业大学学报, 2013, 27(3): 46-50.
Yang Guangwen, Xiao Qianghui, Zhu Guanghui, et al. The Research of Vector Control for Double-Fed Asynchronous Wind Turbine[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2013, 27(3): 46-50.
- [3] Abdel-Baqi O, Nasiri A. A Dynamic LVRT Solution for Doubly Fed Induction Generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(1): 193-196.
- [4] 张保会, 王进, 李光辉, 等. 具有低电压穿越能力的风电接入电力系统继电保护的配合[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 1-7.
Zhang Baohui, Wang Jin, Li Guanghui, et al. Cooperation of Relay Protection for Grid-Connected Wind Power with Low-Voltage Ride-Through Capability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 1-7.
- [5] 杨国生. 风力发电机保护及其对配电系统保护的影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2008: 35-64.
Yang Guosheng. Wind Turbines Protection and Its Impact on Distribution System Protection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008: 35-64.
- [6] 刘为, 范春菊, 张兆宁, 等. 配电网输电线路反时限过流保护探讨[J]. 继电器, 2003, 31(3): 23-25.
Liu Wei, Fan Chunju, Zhang Zhaoning, et al. Discussion of Inverse Overcurrent Protection for Transmission Line in Distribution System[J]. Relay, 2003, 31(3): 23-25.
- [7] 车倩, 陆于平. 采用 Crowbar 实现低电压穿越的风电场继电保护定值整定研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 97-102.
Che Qian, Lu Yuping. Research on Wind Farm Relay Protection Value Setting Based on Crowbar Circuit LVRT Technology[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 97-102.
- [8] Abbey C, Joos G. Effect of Low Voltage Ride Through (LVRT) Characteristic on Voltage Stability[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41(3): 1-7.
- [9] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 178-190.
Zhang Baohui, Yin Xianggen. Power System Relay Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005: 178-190.

(责任编辑: 廖友媛)